

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ Re И Ru, ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖЕК

Попов Н.А.

Руководитель – д.т.н. Лесников В.П.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, n.a.popov@ustu.ru

Анализ исследований показывает, что достижение максимального уровня жаропрочности рабочих лопаток турбины высокого давления (ТВД) газотурбинных двигателей (ГТД) возможно за счет применения монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением. При таком легировании предел длительной прочности может быть существенно повышен, что позволит увеличить тягу двигателя на 15 – 20 % и его ресурс в 1,5 – 2 раза. В этой связи перспективным является применение безуглеродистых монокристаллических сплавов, легированных Re и Ru для лопаток ТВД современных ГТД с температурой газа на входе в турбину 1580 °С [1-3].

Недостаток сведений о структуре и фазовых превращениях в монокристаллических сплавах при высоких температурах обусловил необходимость систематического исследования структурной и фазовой термостабильности сплавов, склонность к образованию топологически плотноупакованных (ТПУ) – фаз в сплавах, а также оценку кратковременных механических свойств сплавов.

Цель настоящей работы - исследование тонкой структуры, химического и фазового состава монокристаллических сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, размера и состава γ - и γ' - фаз в сплавах, образование ТПУ - фаз после выдержек в интервале температур 1050...1300 °С.

Исследования проводили на монокристаллических образцах из сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, отлитых в промышленных условиях на установках типа УВНК-8П со скоростью кристаллизации 8-10 мм/мин с кристаллографической ориентацией [001]. Химический состав сплавов и режимы их термической обработки приведены в [3-5].

Отлитые заготовки Ø14мм после термической обработки были подвергнуты высокотемпературным выдержкам в течение 0,5...1000 часов в интервале 1050°...1300°С в печной воздушной атмосфере.

Металлографические исследования и анализ химического состава фаз проводили методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборах “Philips SEM 535” с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) “Edax Genesis 2000” и “Jeol JSM 6490 LV” с приставкой для МРСА “Oxford Inca Drycool”. Электронно-

микроскопические исследования тонкой структуры сплава осуществляли методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг на приборах “ЭМВ-100Л” и “Jeol JEM-2100”.

После полной термической обработки для сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ получена однородная, дисперсная ($\gamma + \gamma'$)-структура с высокой объемной долей упрочняющей γ' -фазы (70-75 об.%) размером 0,3 - 0,4 мкм. В междоузлиях участки частицы γ' -фазы несколько крупнее, а отдельные из них достигают ~ 1 мкм. Частицы γ' -фазы имеют характерную кубоидную форму. Электронографический и микродифракционный анализы показывают, что частицы γ' -фазы выстроены в направлениях типа $[100]_{\gamma}$ монокристалла.

Для высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ при кристаллизации с невысоким термическим градиентом в зоне кристаллизации характерна повышенная ликвация легирующих элементов. После термической обработки не происходит полного устранения ликвационной неоднородности сплавов: оси дендритной ячейки значительно обогащены W, Re, Ru, Mo, Cr по сравнению с междоузльным пространством. Требуется несколько десятков часов высокотемпературного отжига, чтобы выровнять концентрацию W, Mo, Ru, Re в осях и междоузлиях пространствах, что нереально осуществить в промышленных условиях [1-3].

В процессе длительных высокотемпературных выдержек в интервале температур 1050...1250°C γ' -фаза сплавов теряет свою кубоидную огранку, происходит ее сращивание и интенсивный рост в направлении, перпендикулярном $[001]$, т. е. происходит образование рафт-структуры (рис. 1). Формирование такой структуры обусловлено перераспределением легирующих элементов в матрице (γ -фазе), обогащением граней кубоидной γ' -фазы γ' -образующими элементами сплава. Движущей силой такого изменения морфологии γ/γ' -структуры сплава под влиянием температуры является несоответствие параметров решеток и модулей упругости γ - и γ' -фаз.

Основная особенность структуры монокристаллических сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ после длительных высокотемпературных выдержек - образование ТПУ-фаз разной морфологии в интервале температур 1050...1200°C. Из-за ликвационной неоднородности монокристаллических сплавов и диффузионных процессов перераспределения элементов W, Re, Ru, Cr, Mo, Co, Ni и Al, Ti, Nb в γ - и γ' -фазах происходит образование ТПУ-фаз. При выделении ТПУ-фаз из γ -фазы она обедняется тугоплавкими элементами сплава, а ТПУ-фазы окружены γ' -фазой. Химический состав и морфология ТПУ-фаз определяются химическим составом монокристаллических сплавов и температурно-временной областью при выдержках [4].

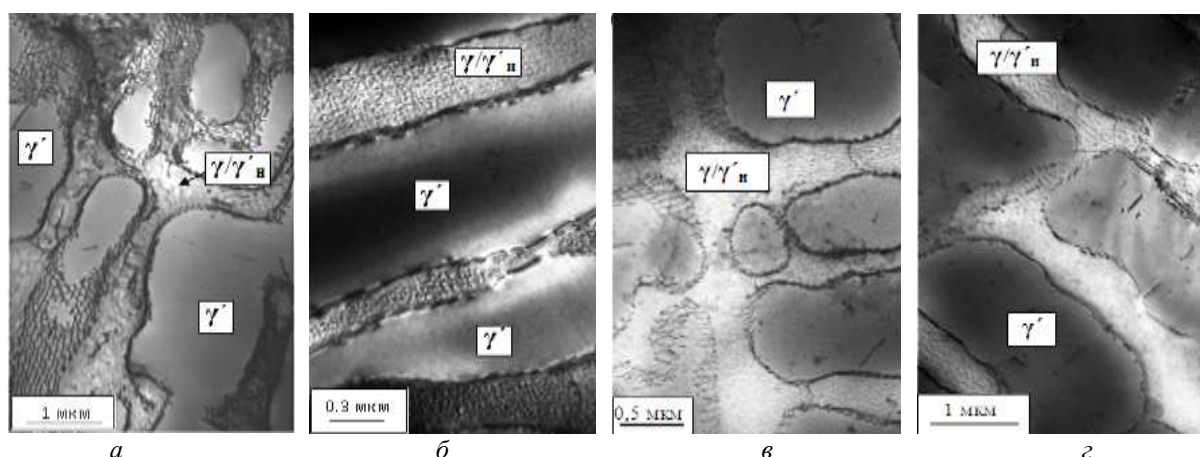


Рис. 1. Тонкая структура сплавов после высокотемпературных выдержек:
 а – $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 час. (сплав ЖС36-ВИ); б – $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 час. (сплав ЖС36-ВИ);
 в – $T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 час. (сплав ВЖМ4-ВИ); з – $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 100 час. (сплав ВЖМ5-ВИ)

Склонность монокристаллического сплава к образованию ТПУ-фаз в осях дендритов ячейки при высокотемпературных выдержках уменьшается в ряду сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ5-ВИ и ВЖМ4-ВИ. Высокой фазовой стабильностью из исследованных сплавов обладает жаропрочный сплав ВЖМ4-ВИ, легированный рением и рутением.

При высокотемпературных выдержках сплавов ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ в интервале температур $1050\ldots 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит образование рафт-структуры, рост первичной γ' - фазы, её обогащение Al, Ti и значительное уменьшение содержания W, Re, Ru в ней. Возрастает толщина прослоек γ – фазы и существенное обогащение её тугоплавкими элементами W, Re, Ru, Cr, Mo.

Работа выполнена при финансовой поддержке УрФУ в рамках конкурса молодых ученых.

Библиографический список

1. Шалин, Р. Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р. Е. Шалин, И. П. Светлов, Е. Б. Качанов, В. Н. Толораия, О. С. Гаврилин. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Каблов, Е. Н. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения [Текст] / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис // В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2007. – М.: ВИАМ. - 2007. - С 27-44.
3. Кузнецов, В. П. Структура и прочностные свойства монокристаллических сплавов на никелевой основе, легированных танталом и рением [Текст] / В.П. Кузнецов, В. П. Лесников, В. Е. Замковой, А. С. Коряковцев. - Екатеринбург: Квист, 2010. – 140 с.
4. Петрушин, Н. В. Высокотемпературные фазовые и структурные превращения в монокристаллах жаропрочного никелевого сплава, содержащего рений и рутений [Текст] / Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, А. И. Самойлов, О. Б. Тимофеева, Е. Б. Чабина // Материаловедение. – 2008. - №10 – С. 13-26.
5. Кузнецов, В. П. Структура и фазовый состав монокристаллического сплава ВЖМ-4 с газоциркуляционным защитным покрытием [Текст] / В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, И. П. Конакова, Н. В. Петрушин, С. А. Мубояджян // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – №3. – С. 28-32.